

大锻件热处理过程中的应力与开裂

牛俊民

近年来,随着对产品质量要求的提高,材料的热处理得到普遍重视。但是,由于缺乏对热处理应力本质的了解和严格的工艺制度,大锻件在热处理过程中常发生开裂。本文试图探讨大锻件热处理过程中所产生的应力以及它与开裂的关系,并联系生产实践中的开裂实例进行分析,找出影响开裂的因素,以便采取有效防裂措施。

一、大型锻件加热时的应力

大锻件由于截面较大,在热处理加热时表面和中心的温差也大,这就造成了表面与中心受热膨胀在时间上的差异。表面温度较高,热膨胀量大,内部温度较低,热膨

胀量小,于是就产生了表面为压应力,内部为拉应力的热应力。若锻件是处在弹性状态,这种应力是很大的。随着温度的升高,当内部温度已达 600°C 以上,由于锻件进入塑性状态,这种应力便得到松弛而减小。因此,锻件心部在未进入塑性状态以前,快速加热是引起内部开裂的重要原因之一。目前,大锻件热处理的加热工艺多采用阶梯加热,即在达到加热温度以前,采用一个或两个中间保温,以减小锻件未进入塑性状态以前的内外温差。图1是直径700毫米35CrMo钢阶梯加热曲线。它采用 $600\sim 650^{\circ}\text{C}$ 的中间保温。从图中看出,在加热过程中两次出现锻件表面和心部的最大温差。第一个最大温差出现

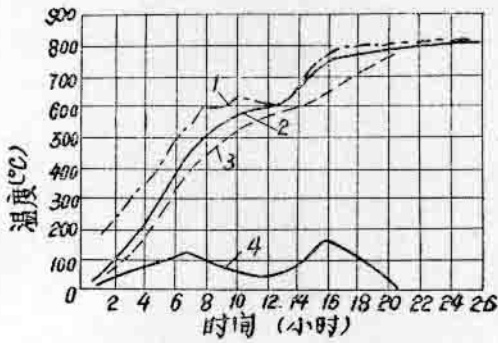


图1 直径70毫米35CrMo钢阶梯加热曲线^[1]
1—炉温 2—工件表面温度 3—工件中心温度
4—表面与中心温差

在600°C以下,这时心部温度约300~400°C,仍处于弹性状态。由于温差而产生的拉应力有可能在锻件心部形成裂纹或者沿心部的某种缺陷形成开裂。所以必须慎重对待中间保温以前出现的最大温差和升温速度。至于中间保温以后出现的第二个最大温差,如前所述,由于整个锻件已处于塑性状态,热应力引起裂纹的可能性则很小。因此大锻件在中间保温以前,一般要控制升温速度在30~70°C/小时^[1]。

锻件保温后继续加热过程中,要发生组织转变,虽然转变前后相的比容不同以及内外层组织转变先后有别,也会产生应力,但这时锻件已处于塑性状态,却不致产生裂纹和开裂。

应该强调,随着钢中碳及合金元素含量的增加,钢的导热系数下降,其内外最大温差也就越大。因此,合金钢锻件加热时,升温速度的控制尤为重要。

二、大锻件淬火冷却时的应力及残余应力

一定尺寸的圆钢从高温快速冷却时,表面冷却快,心部冷却慢,内外温差逐渐增大。由于表面先冷却要收缩,仍处于热状态的心部阻止它的收缩,所以心部使表面受拉;

相反,表面使心部受压。这种应力随着锻件内外温差的加大而增加。但是钢在高温下屈服强度较低,且具有很高的塑性,所以这时的热应力不可能很大,且随着内部的塑性变形而松弛。当外部先进入弹性状态形成冷硬外壳以后,将不允许按照心部速度降低需要收缩的要求改变容积和形状,对心部的收缩产生阻碍作用。这时锻件中热应力的分布将发生改变,表面由原来的受拉转变为受压,心部受压转变为受拉,并且随着冷却的继续进行而不断地增大,一直残留到常温,这种应力叫做残余热应力,如图2(a)所示。

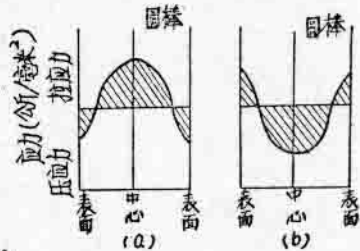


图2 (a)热应力型 (b)组织应力型^[2]

钢件淬火产生马氏体转变,这种转变温度大多在250°C以下。急冷时,表面先进行马氏体转变,而马氏体比容大于奥氏体比容。因此,表面先发生膨胀,未发生组织转变的心部将阻碍其膨胀,因而此时表面受压,心部受拉。随着冷却过程的进行,这种应力不断增加。但是由于这时心部温度较高,而且处于奥氏体状态,塑性较好,将发生不均匀的塑性变形,使应力松弛。继续冷却,心部开始转变成马氏体时,由于表面组织已变成硬度很高、塑性很差的马氏体,阻碍它的膨胀,应力将反转为心部受压,表面受拉,形成残余组织应力,如图2(b)所示。

一般说来,热处理应力是这些残余应力的叠加,形成非常复杂的应力分布。不过有些情况是以热应力为主,有些是以组织应力为主。

大型锻件截面较大,淬火冷却时所造成的内外温差也大,因此残余应力也很大。此

表1 我厂解剖过的大锻件淬火组织分布情况

材质名称	工件直径	热处理情况	淬火组织分布(距表面距离 毫米)		
			全马氏体层	半马氏体层	马氏体消失
40Cr叉头	φ 650毫米	850°C油淬	10.5	15	25
40CrMnMo 连接轴	φ 818"	860°C油淬	10	30	50
			贝氏体: 出现10	78	160
45钢柱塞	φ 580"	860°C水淬	8	—	—
40Cr岗轴	φ 760"	840°C水淬油冷	—	—	28

外,大锻件不容易完全淬透,往往只淬透一定深度的表层,这样就产生了沿截面上组织的差异引起的应力。表1列出了我厂曾解剖分析过的大锻件淬火组织分布情况。从表中看出,完全淬为马氏体层离表面不过10毫米左右。

由于转变组织的比容不同(表面组织比容大于心部组织比容)以及随后冷却过程中残余奥氏体的分解,因而增大了锻件表面的压应力和中心的拉应力。资料[2]介绍了淬透层深度对热处理残余应力的影响,在淬不透的情况下,内应力的分布是热应力类型的。表面淬透层是压应力,心部产生拉应力,当淬透层减小,心部增大的时候,表面压应力区的范围减小,数值增大,而当淬透层很深,心部很小时,心部拉应力区的范围很小,数值很大。图3是φ150毫米碳钢在未

淬透情况下的残余应力曲线。从图中看出,内应力分布是热应力型的,中心的拉应力达到最大值。所以大锻件淬火时,由表面引起的由外向里开裂较少,而多为由里向外引起的开裂。

三、回火时残余应力的变化

一般说来,回火可消除热处理残余应力。资料[3]报道了不同温度回火对淬火应力消除的程度。在400°C回火后能使淬火残余应力减少到1/3;500°C回火则减少到1/5以下;600°C的回火则能基本上完全消除淬火的残余应力。

但是,回火加热时的升温速度还是要十分注意,因为升温时的锻件内外温差可加大残余应力,从而使心部产生更大的拉应力。

许多资料都介绍,淬火后及时回火可以避免淬火开裂。生产实践也证明,及时回火是防止淬火裂纹和开裂的有效措施。

四、淬火裂纹与开裂实例分析

如所周知,材料淬裂的条件是淬火产生的残余拉应力超过了材料的抗拉强度。因此,除去热处理残余拉应力之外,淬裂还与材料强度有关,防止淬火开裂必须从这两方面予以注意。

工件淬裂,除分析工件的材质、热处理工艺及操作有异常外,首先应观察断口。一般断口有光滑断口和不光滑断口两种类

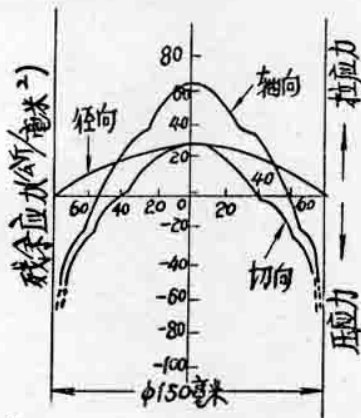
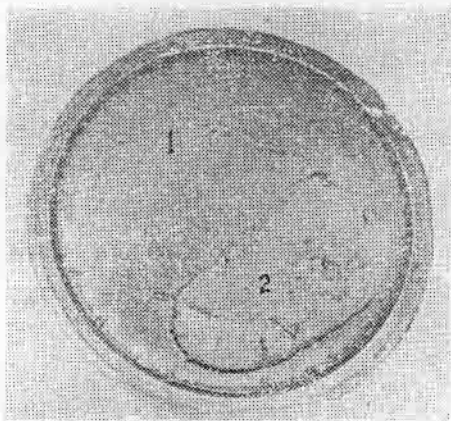
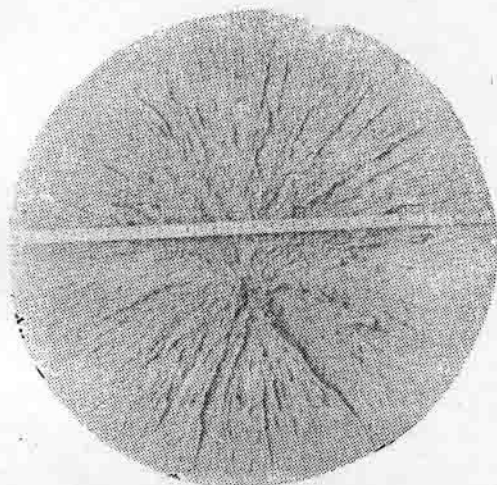


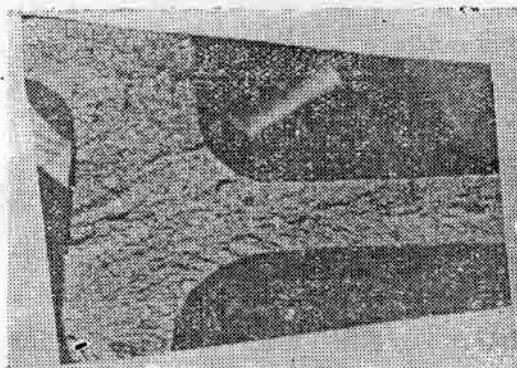
图3 0.4% C 碳钢, 850°C 喷水淬火时的残余应力曲线^[1]



照片1 疲劳断口
1—光滑区 2—不光滑区



照片2 从心部向外放射状裂痕的断口



照片3 具有八字形裂痕的断口

型。疲劳断口属于前一种(照片1)，它是在力的多次(一般为 $10^5 \sim 10^7$ 次)作用下产生

的，断口有光滑区与不光滑区两部分。淬裂断口是不光滑的突发型，属于后一种(照片2，照片3)。在观察断口时，首先找裂纹源，即裂纹的“基点”。照片2断口的心部放射状裂痕的“收敛点”就是裂纹源；照片3中八字形裂痕的“收敛点”，即车轮踏面的表面淬火裂纹是断裂起源。其次是观察断口颜色，水淬或油淬时产生的裂纹断口往往因附着水或油，回火后变黑。在回火过程中产生的裂纹，因回火温度不同其断口颜色不同， $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 是兰色、 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 为紫灰色，常温下产生的断口是白亮的。

例1 40Cr 钢叉头淬火回火裂纹分析

叉头材质为40Cr钢，尺寸 $\phi 640 \times 870$ 毫米，共处理4件全裂，裂纹位置见图4。图5是热处理工艺，淬火入油时开口向下。照片4是淬裂位置的裂纹情况。照片中箭头1是淬火时产生的裂纹，深度5毫米，黑色；箭头2是回火时裂纹的扩展， $15 \sim 20$ 毫米宽，灰色。

为了检验原材料有无缺陷，在锻件图4

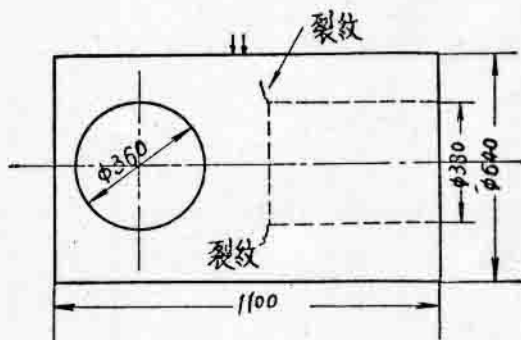
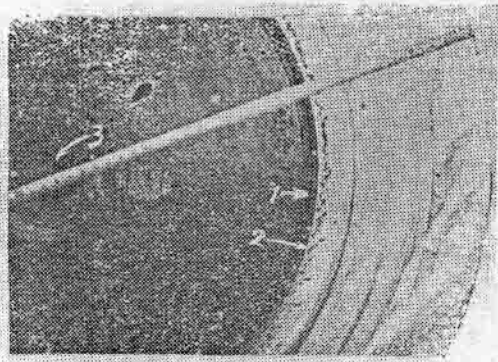


图4 40Cr叉头尺寸及淬裂位置



图5 40Cr叉头热处理工艺曲线



照片4 40Cr钢叉头裂纹情况

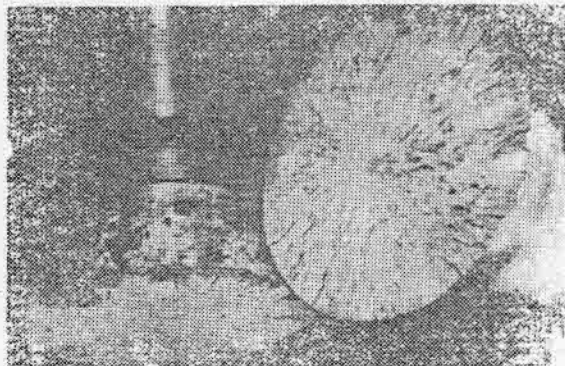
箭头处取低倍试样，分析结果为一般疏松3级，同时在低倍片上做横向机械性能检验，按重标21~62验收，材料性能合格。为了验证热处理入油时开口向下的影响，在外表面与内孔壁两处取样观察金相组织，由于开口向下，内壁得不到急冷而未能淬硬，其组织为珠光体+铁素体。

淬裂原因分析结果认为，造成开裂原因并非由于材料存在不允许缺陷。由于锻件淬火时开口向下入油，内壁得不到充分冷却，产生很大拉应力（内孔壁若能淬硬应是压力），这是引起淬火裂纹的主要原因。回火时裂纹扩展可能是由于回火装炉温度太高，由于内外温差加大了内孔壁的拉应力所致。此外，内孔加工时底部有尖角，造成应力集中，这是开裂的外因。以后的实践证明上述分析是正确的，在改为开口向上淬火后没有再发生过这种裂纹。

大型锻件在淬火时，内孔（包括通孔与不通孔）要同时冷却，这样使内壁受压应力，可避免心部（往往心部缺陷较多）受拉应力而引起从里向外的开裂。

例2 造纸机刀辊轴断裂分析

刀辊轴是50钢锻件，调质状态，热处理尺寸为 $\phi 260 \times 3000$ 毫米，在精加工组装后吊放时断裂。断口形态见照片5。断裂起源于中心部位，在该处取样作低倍，发现有小块夹渣。金相分析发现淬硬层很浅，大部分



照片5 刀辊轴断口

已车掉，心部组织为铁素体+珠光体。热处理工艺为830℃保温5小时，水冷，480℃回火。经了解，热处理车间无专用大型回火炉，两炉淬火工件合并为一炉回火，需等淬火加热炉降温以后方可装炉回火。在所处理的23根刀辊轴中，有一根因配炉、等件等原因，淬火后十几个小时以后才回火。

综合上述情况，刀辊轴断裂时所受外力并不大，不应该产生断裂，可能工件存在着横向裂纹。从热处理结果来看，心部很大截面没有淬透，工件的残余应力属于热应力型，表面受压，心部受拉。这种应力将随着温度的降低而增加。淬火回火间隔时间过长，一则易使工件“凉透”，增加了热应力；另外，表面淬透层残余奥氏体的分解，体积膨胀也增大了心部的拉应力。又加上锻件心部原有夹渣缺陷，降低了材料的强度。当心部纵向拉应力超过材料破断强度时，就产生了横向内裂，工件表面受压应力，内裂尚未延至表面。工件外圆加工量较大，精加工后内裂暴露，所以在吊装时引起横向断裂。

例3 630吨打包机柱塞淬裂分析

打包机柱塞是45钢锻件，单重7吨，调质处理工艺见图6。工件形状及淬裂位置见图7。淬火时用天车吊着工件上下串动，入水10分钟时，由于天车停电而停串，停串后2分钟听到裂响。10分钟后天车修好，又开始串动，接着又停电两次。在第二次停串时

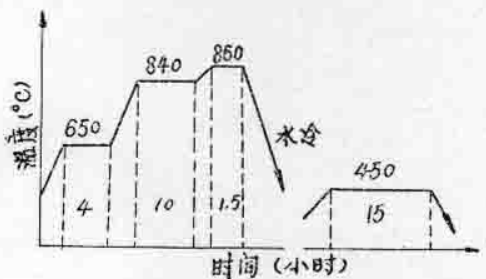


图6 45钢柱塞热处理工艺

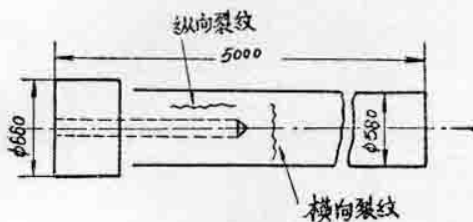
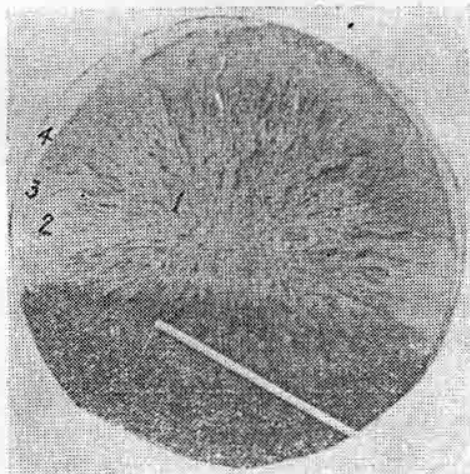


图7 45钢柱塞尺寸及淬裂位置



照片6 45钢柱塞断口取3/10

又听到一次裂响。水淬共70分钟，出水后听到第三次裂响，但未发现工件裂纹，误认为吊具产生淬裂，继续进行回火。在回火后发现如图7所示的表面裂纹。

初步分析判定，表面的裂纹是内裂延至表面，在横裂纹处经轻轻一撞就断成两截，断口见照片6。断口呈纤维状，明显分4个区域。区域1是第一次裂响形成的内裂，未暴露表面，放射状裂痕起源于心部；区域2

则从第一次裂纹的边缘作为许多新的裂源起点，形成松针裂痕；同样道理形成了区域3；区域4是刚撞断的新断口。区域1、2中靠表面有一部分断口颜色为黑色，是由于水淬时第二次裂响后，内裂延至表面，淬火水渗入，回火后变黑所致。除区域4以外，其余部位都是灰兰色，是未沾染的断口在400~500°C时回火颜色。区域4白色系新鲜断口。

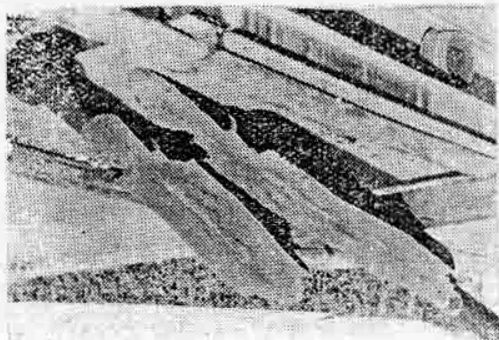
超声波探伤鉴定，纵向裂穿过中心盲孔一直延伸至横向断裂处为止。热处理以前原材料也已作过探伤，除个别区域有小块心部夹渣外，未见一般锻件中不允许的缺陷。

综上所述，造成纵向及横向断裂的根本原因是，锻件在热处理过程中，应力的分布是表面淬硬层部分受压，心部受拉。当天车停电、停串时，盲孔内得不到急冷，加大了内部的拉应力，当这种应力数值超过材料心部抗拉强度时，便产生内裂纹。由于裂纹尖端应力集中，在拉应力作用下迅速扩展，很快形成断裂。

例4 42CrMo 钢辊子淬火开裂

一批 $\phi 410 \times 3500$ 毫米42CrMo钢辊子，在处理第三根时产生纵向开裂(照片7)。热处理工艺是650°C保温2小时，830°C保温3.5小时，水淬4分钟，油冷55分钟，出油后开裂。

观察断口，发现中心部位有一条长2500毫米的绿色长带，分析这个长带是缩管残余，而中间绿色物质系熔溶的渣子，经锻造



照片7 辊子断裂情况

拉长而形成。后经化验，绿色物质含氧化铁0.9%，主要成份是CaO、SiO₂。很明显，辊子的淬裂是由于材料中存在残余缩管引起的。当热处理淬火产生很大的残余应力时（工件未淬透属热应力型），心部尽管轴向热应力大于切向拉应力，但由于材料心部存在纵向裂纹缺陷，在切向拉应力作用下很容易发生纵向开裂。

在分析大型锻件热处理后的断裂原因时，辨别正常无缺陷断口与有缺陷断口是非常重要的。因为在淬火开裂的断口中，有严重缺陷的占比例不小。例如，白点常引起淬裂，顺白点纵向开裂时，断口上能见到椭圆形的白色斑点；垂直白点裂纹方向开裂时，断口上常见到许多小裂纹，在裂纹两侧断口有突跳，裂痕都起源于白点处。缩管残余多在锻件的冒口端引起纵向开裂，在断口中心部有明显的区别于纤维状断口的形态。起源于夹渣的断裂，断口上往往有颜色差别，夹渣处呈黑色或灰色。锻件中有内裂或夹渣裂纹时，有缺陷的位置要出现凹凸不平的断口。

缺陷可以造成淬火开裂，但是不能说锻件中有了缺陷就不能再进行热处理后使用，

只要不是属于标准中规定不允许的缺陷，就应该采取措施，避免由于热处理淬火引起开裂，我们在热处理40Cr钢主减速机大轴（ $\phi 750 \times 4300$ 毫米）时，由于采取了减小热处理应力的措施，取得了满意的效果。该件重10吨，在热处理前的超声波探伤中发现较严重的缺陷反射波，1.25MC探伤缺陷对底波多次反射影响很大，并且缺陷有一定的方向性，可能是夹渣在锻造中打扁所致。考虑到探伤中发现该件晶粒粗大，调质热处理前，先进行一次正火，以细化晶粒，减小锻件的不均匀性，提高材料强度。对装炉温度和升温速度都做了的严格规定，并且在450℃、650℃两次中间保持，淬火以后及时回火，从而避免了淬火开裂。

参 考 文 献

- 〔1〕 东北重型机械学院等合编：《大锻件热处理》，1974
- 〔2〕 浙江大学《新技术译丛》编译组：热处理变形与开裂，1973
- 〔3〕 朱荆璞：谈谈热处理应力及其作用，《金属热处理》，1979，2



访问我们的官方网站了解更多内容

扫描二维码关注